

WEST

Cite

☐ Generate Collection

L1: Entry 9 of 11

File: JPAB

Feb 22, 1994

PUB-NO: JP406047667A

DOCUMENT-IDENTIFIER: JP 06047667 A

TITLE: PROCESSING METHOD UTILIZING UNDERWATER HIGH-SPEED WATER JET

PUBN-DATE: February 22, 1994

INVENTOR-INFORMATION:

NAME

COUNTRY

OBA, RISABURO

IKOHAGI, TOSHIAKI

SOYAMA, HITOSHI

YAMAUCHI, YOSHIAKI

OSHIMA, RYOICHIRO

SATOU, KAZUNORI

SHINDOU, TAKENORI

KUROSAWA, KOICHI

ASSIGNEE-INFORMATION:

NAME

COUNTRY

BABCOCK HITACHI KK

APPL-NO: JP04203962

APPL-DATE: July 30, 1992

INT-CL (IPC): B24C 1/10; C23G 3/00

ABSTRACT:

PURPOSE: To increase the peening efficiency by feeding bubble cores sufficiently in the form of bubbles with a sufficient large diameter.

CONSTITUTION: Under the water 604, the water 602 fed from a high pressure pump is injected from a nozzle 1 at a high speed, and a high speed water jet 607 accompanying a severe cavitation is hit to a work piece in the water 604. In this case, ambient cores to be the cause to expedite the cavitation are fed forcibly to the upstream side of the generating area of the second peak in the cavitation shock pressure generated at the under-water high-speed water jet 607 (606). Consequently, the cavitation generated to the under-water water jet 607 is expedited, and the residual stress of a steel material and the like is reduced, and at the same time, the attachment is reduced and the pressing efficiency is increased.

COPYRIGHT: (C)1994,JPO&Japio

(19)日本国特許庁(J P)

(12) 公 開 特 許 公 報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開平6-47667

(43)公開日 平成6年(1994)2月22日

(51)Int.Cl.⁵

識別記号

庁内整理番号

F I

技術表示箇所

B 2 4 C 1/10

Z 7411-3C

C 2 3 G 3/00

A 9271-4K

審査請求 未請求 請求項の数3(全11頁)

(21)出願番号 特願平4-203962

(22)出願日 平成4年(1992)7月30日

(71)出願人 000005441

パプコック日立株式会社

東京都千代田区大手町2丁目6番2号

(72)発明者 大場 利三郎

宮城県仙台市青葉区川内亀岡北裏J19-7

(72)発明者 井小萩 利明

宮城県黒川郡富谷町日吉台1-17-18

(72)発明者 祖山 均

宮城県仙台市若林区若林3-6-47 レオ

パレス若林第2-203号室

(74)代理人 弁理士 武 顕次郎

最終頁に続く

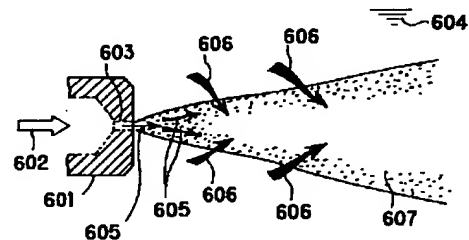
(54)【発明の名称】 水中高速水噴流を利用する加工方法

(57)【要約】

【目的】 水中水噴流に発生するキャビテーションを促進することを目的とする。

【構成】 水中水噴流に発生するキャビテーション衝撃圧における第2番目のピークの発生領域の上流側に、周囲核を強制的に供給606することを特徴とする。

【図7】



【特許請求の範囲】

【請求項1】 水中において、高压ポンプから供給する水を、ノズルから高速で水中に噴射し、水中にある被加工物に激しいキャビテーションを伴う高速水噴流を衝突させる加工法において、

前記水中高速水噴流に発生するキャビテーション衝撃圧における2番目のピークの発生領域の上流側に、キャビテーション促進要因となる周囲核を強制的に供給することを特徴とする水中高速水噴流を利用する加工方法。

【請求項2】 請求項1記載において、空気等の気体、あるいは空気等の気体を飽和状態近くに含有する水のうち少なくともいずれか一方を、周囲核を同伴供給する周囲噴流として、当該高速水噴流の初速度の少なくとも1/20以上の初速度で噴出させ、主噴流としての当該高速水噴流に合流混合させるとともに、合流室流量比を当該主噴流質量流量の0.3%以上45%未満とすることを特徴とする水中高速水噴流を利用する加工方法。

【請求項3】 請求項1または2記載において、中心部に開口し主噴流としての当該高速水噴流を噴射する主噴出孔と、主噴出孔の周囲に複数個開口し周囲核としての気体あるいは気体を飽和状態近くに含有する水を噴射する周囲噴出孔あるいは気体を導くカラーまたは案内板からなり、主噴出孔の中心軸を10°以上60°未満の傾斜角度になるごとく各噴出孔の開口方向を構成するノズルを用いることを特徴とする水中高速水噴流を利用する加工方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【産業上利用分野】本発明は、鋼材等の残留応力低減技術に係わり、水中において激しいキャビテーションを伴う高速水噴流を加工材の表面に衝突させることによつて、引張方向に過大応力が残る表面を圧縮応力が作用するまでに処理しようとする技術に関するものである。

【0002】

【従来の技術】応力腐食割れ(SCC)を起こすポテンシャルのある熱影響部を有する既設構造物の表面応力は、小さな鋼球を気流の勢いで吹きつけるシヨットブラスト、砂粒を用いるサンドブラスト、米粒を用いるクライオブラスト等によるピーニング処理を行い、応力を引張方向(亀裂を拡大させる方向)から圧縮方向へと改善する。このようなピーニング技術は、残留応力対策として各種機械構造物あるいは部品加工時に広く用いられている。

【0003】しかし、このようなブラスト操作の出来ない環境にありながら、是非ともピーニングしなければならない構造物も多い。例えば、水を張った状態の特殊な熱交換器や反応槽、あるいは海洋構造物の溶接部は、いずれも水を除いての作業は物理的あるいは経済的にも不可能に近い。また、ブラスト粒子を水中から回収することは大変な難作業である。米粒を用いれば回収は不要で

あるが、経済的なメリットは出にくい。

【0004】高速ウォーターージェットの利用は、ユニークな加工、探鉱あるいは洗浄技術として知られるが、これを表面応力改善に利用する試みが、ウエスチングハウス・エレクトリック社により行われた(特開昭62-63614号)。水噴流によるピーニングは、水冷効果もあつて局所的な温度上昇を防げるというメリットもある。

【0005】しかしこれは、水噴流の軸動圧力を有効に利用できる大気中の作業であり、この技術は水中施工へとは直接応力、展開するのは難しい。水中では、噴流軸動圧力の減衰がかなりはやい。これは、周囲水の抵抗と、同じ液相であるがために拡散がはやいことに起因する。水中において、気相中水噴流なみの軸動圧力を得るためには、超高压発生装置が必要になり、コスト的に大変不利な技術になつてしまう。

【0006】一方、水中水噴流には、キャビテーションを起こさせるのに十分大きなサイズの気泡核噴流の乱れと、それと周囲水との剪断作用の複合効果により、壊食率が通常のものより1~2桁も大きい激しいキャビテーションが発生する。このような激しいキャビテーションを促進し、多量に発生する気泡の崩壊衝撃圧力を有効に利用できれば、気相中水噴流なみのピーニング効果をさほど高くない噴射圧力で達成できる可能性がある。また、気相中水噴流の利用には、極めて危険な飛散噴流に対する防災対策という重大な問題を抱えているが、水中で急速に減衰する水中水噴流にはこのような問題はほとんどない。

【0007】図18と図19に従来技術の2例を示す。図18のノズルは水中におけるキャビテーションを促進するために提案されたノズルである。図19の例は、水中において部品に固着した汚物をキャビテーションを利用して除去しようとするものである。

【0008】これらの図において、1501はノズル本体、1502はオリフィス部、1503は円錐開口部、1504は円錐空洞部、1505は配管部材、1506は高压噴出装置、1507は噴射加工対象物、1601は水槽、1602は被洗浄部品、1603はノズル、1603aはノズル先端、1603bは噴出孔、1604は水、1605は管路である。

【0009】この図19においては、ノズル1603と被洗浄部品1602間の距離(スタンドオフ距離)、噴射圧力あるいはノズル1603の仕様を適切に定めなければ、付着した汚物をうまく除去できないばかりか、部品に損傷を与える問題が生じる可能性がある。

【0010】

【発明が解決しようとする課題】水中水噴流に発生するキャビテーションが不活発であれば、衝突しても材料に対する影響力は乏しい。残留応力改善に利用しようとしても、長時間にわたり衝突させても応力状態が変化しな

いのであれば、施工効率は低下することになる。さて、水中の水噴流にキャビテーションを起こさせる気泡核には、「流入核(inflow nuclei)」と「周囲核(ambient nuclei)」がある。前記流入核はポンプを通じて供給され、ノズルから高速で噴射される水噴流の中に存在するタイプである。

【0011】一方、周囲核は、噴射される水以外の周囲にある水中に存在する核である。実際の水噴流では、これら両核に由来するキャビテーションがともに十分に大径のものに発達し、それらがノズルから噴射された噴流の内部あるいは界面において複雑に干渉し合い、結果的に激しいキャビテーション状態となる。施工環境となるある種の容器内の水中には、気泡核すなわち周囲核が乏しいことがよくある。一方、この容器内の水を循環させ噴射用の水として利用しようとする、流入核も少ないことになる。深い容器で大気と接する水面の面積が少なく、しかもその水面が静寂で乱れることがなければ、結果的に核は、その直径は小に、かつその数も少なくなる。一般に気泡核は、水中に溶解した空気等の気体が微小な気泡の形態として浮遊しているものであるからである。水面が乱れていなければ、空気は極めて水中に溶け込みにくくなる。

【0012】ノズルから上記水中へ噴射する水は、プランジヤポンプあるいは遠心ポンプにより加圧されるため、水中にある気泡核は圧縮されて潰れ、その多くは結局消滅してしまう。しかも、ポンプで加圧される場合には、多くの気泡核の中でも、材料に対する破壊力が大きくパワフルなキャビテーションとして成長する筈の大きな気泡核から選択的に消滅してしまう。促進されたキャビテーションを作り出そうとして噴射圧力 P_1 を大きくしても、ポンプにおいて大きな加圧力を受けるために、より多くの気泡核が消滅することになる。従って、キャビテーションを活性化しようとして噴射圧力 P_1 を高めていっても、噴射圧力 P_1 による影響は頭打ちになる傾向がある。

【0013】本発明の目的とするところは、このような問題点を解決し、十分大径の気泡の形で気泡核を十分に供給して、水中水噴流に発生するキャビテーションを促進し、水中構造物の残留応力改善や付着物除去の水中加工における施工効率を高めることにある。

【0014】

【課題を解決するための手段】ノズルから高速で噴射される主噴流中に含まれる、いわゆる「流入核」は、噴射圧力、即ちポンプの吐出圧力の影響を受けるため制御しにくい。制御する場合には、ポンプの吐出圧力を変えることになり、主噴流の噴射条件そのものが異なってしまう。

【0015】本発明では、主噴流としての水中水噴流に対し、強制的に「周囲核」を供給する方法を採用する。ノズル本体の中央に開口する主噴出孔から噴出する高速

水噴流における特定の合流スタンドオフ距離 X_m (ここでいうスタンドオフ距離とは、ノズルの全噴出孔から噴流中心軸に沿って下流へ向かつての距離のことを意味する)をターゲットとして、主噴出孔の周囲に開口する複数の周囲噴出孔から、空気を気泡の形態で、あるいは空気を飽和状態近くを含んだ水を低速で合流混合させる。

【0016】上記の合流スタンドオフ距離 X_m は、主噴出孔からの主流水噴流のキャビテーションが発生する衝撃圧の第2ピーク位置(後述)よりも、僅かにノズル寄り(上流側)になるように周囲噴出孔の開口構造を設定する。また合流角度、つまり主噴出孔の中心軸と周囲噴出孔の中心軸との合流角度は最適なものになるようにする。

【0017】この合流角度が小さすぎると、主噴出孔からの高速水噴流と周囲噴出孔からの言わば周囲核供給流とが平行に流れるようになり、混合は両流れの剪断のみの効果でしか進まなくなる。従って、周囲核供給の効果が乏しくなる。

【0018】逆に合流角度が大きすぎる場合には、主噴出孔からの高速水噴流の上流部に大きな気泡が過度に供給されたり、ノズルの近傍で余りにも夥しく多くのキャビテーション気泡が発生すると、いわゆるクツシンの作用により、材料に対するキャビテーションの影響力が小さくなってしまふ。キャビテーションの発生が促進されても、材料への影響力のあるキャビテーションはその一部のタイプであり、キャビテーションが多過ぎるとクツシン効果により、必要なキャビテーションの威力が減少してしまうことになる。従って「気泡核」は、水中水噴流の最適な場所に、適度な条件で適切な量だけ供給しなければならない。

【0019】

【作用】上記した方法により、水中の高速水噴流に供給された「周囲核」は、高速水噴流との剪断層あるいは高速水噴流内のコア部へ貫通し、高速水噴流中の大小様々な渦の干渉により、渦糸キャビテーションとして成長する。この渦糸キャビテーションは、「第2ピーク位置」近くにおいて、高速噴流の内部あるいは界面部に多数あらわれる。その形態は、微小な気泡が紐状に言わば数珠のように連なっているかのようである。

【0020】渦糸キャビテーションは、加工対象面となる固体面に叩き付けられるように衝突する。このタイプのキャビテーションは紐状であるから、衝突現象は、気泡列の「ムチ」で固体面を叩くような様相を呈する。固体面に衝突した気泡は崩壊し、固体面上に強い衝撃圧力を加えながら、半径方向へ放射状に流れ、最終的には消滅する。本発明の特徴は、この重要な渦糸キャビテーションの発生を著しく活発にすることである。

【0021】渦糸キャビテーションはパワフルで、噴流中に存在する他のタイプのキャビテーションに比べて、材料に対する影響力が大きい。特にステンレス鋼の場

5

合、発生した衝撃圧力によつて結晶粒が潰れ、表面の残留応力は圧縮側へと改質される。また、ステンレス鋼に限らず鋼材表面が強靱になるため、疲労強度も向上する。

【0022】一方、この渦糸キャビテーションは、広い空間に分散しているため、局部的に材料表面を損傷させたりすることはない。従つて、渦糸キャビテーションの制御が、水中ピーニング加工にとつて極めて重要ということになる。

【0023】

【実施例】図1は、本発明の具体化例であり、水中において高速水噴流を利用する加工方法の概念を描いたものである。

【0024】ノズル1の中心軸9上に開口する噴出孔からは、水6中に高速水噴流が噴射される。この水中高速水噴流には、激しいキャビテーションが発生するが、図中ではキャビテーションの輪郭3として描いている。キャビテーションを伴う主流としての高速水噴流は、加工対象面4に衝突する。

【0025】ノズル1の外周側からは、多数の周囲核を含む低速の周囲流（気泡流あるいは空気を飽和状態に含んだ水流）が、主流である高速水噴流に向けて噴射され、高速水噴流の特定位置において合流する。

【0026】この周囲核供給流7の噴出流速は、主流である高速水噴流の $1/20 \sim 1/4$ 程度に設定する。周囲核供給流7の流量は、周囲核供給流7がかなり微量であつても効果が認められるので、高速水噴流のその0.3%~45%の範囲に設定するとよい。周囲核供給流7が微量であつても有効であるのは、供給された気泡核がトリガとなり、水中に安定に存在していた気泡核が励起されて、連鎖的に次々と成長し始めるからである。周囲気泡核の極めて少ない環境であれば、周囲核供給流7の割合を、この範囲内において増やす。

【0027】両流れの合流した位置より僅かに下流において、キャビテーションが活性化するキャビテーション促進領域8が生じて、材料に対して強い影響を与える渦糸キャビテーションが活発に生成する。この領域8において生じたキャビテーションと上流側から流入してくるキャビテーションは、干渉し合いながら共に加工対象面4に衝突する。

【0028】衝突によつてキャビテーション気泡は崩壊し、加工対象面4上あるいはその直ぐ近傍において強い衝撃圧を発生させる。キャビテーション気泡は夥しく多数であり、しかも次々と連続的に供給されるため、加工対象面4は、ショットピーニングされたのと同様の状態となる。このようにして、加工対象面4の引張方向残留応力は圧縮側へと改質されることになる。衝突した後の噴流は、跳ね返り噴流5として放射状に飛散していく。

【0029】図2ならびに図3は、中心軸を通る断面図および噴出した方向からノズル側を見た正面図である。

6

【0030】このノズルにおいては、中央に高速水噴流が噴出する主噴出孔205がノズル本体201の前面に開口している。この主噴出孔205へは、高圧水供給管路203とこれに接続する径収縮部（しぼり部）204を経て、高圧水202が供給され、主噴流の高速水噴流として周囲水212内へと噴射される。

【0031】主噴出孔205の周囲には、その中心軸211が主噴出孔205の中心軸206と1点で交わるように開口する4個の周囲噴出孔210が開口している。

この周囲噴出孔210からは、空気あるいは空気で飽和した水207が上記したように主噴出孔205からの高速水噴流のそれに比較して低速で噴射される。このノズルにおいて、空気あるいは空気飽和水207は、供給管路208および径収縮部（しぼり部）209を通じて、周囲噴出孔210へと供給される。主噴出孔205の中心軸206と周囲噴出孔の中心軸211は、主噴出孔205の出口から X_m だけ離れた位置で、片振り角度 θ で合流する。

【0032】この距離 X_m 、即ち高速水流と周囲核を含む流れとの合流距離は、主噴出孔205の出口と加工対象面213間の距離 x_2 よりもやや短く設定する。 X_m は $40 < x_2 / D < 90$ に、また x_2 は $60 < x_2 / D < 150$ の範囲で設定する。 x_2 の添字‘2’は、キャビテーションを伴う水中水噴流に発生する衝撃圧分布の2番目のピーク（第1ピークはノズルにより近い距離にある）を表している。前記Dは、主噴出孔205の直径である。合流角度 θ は、 $10^\circ \sim 60^\circ$ の範囲内に、さらに望ましくは $15^\circ \sim 45^\circ$ の範囲になるようにノズルの構造を決定する。

【0033】図4は、水および周囲核供給系の概略を示したものである。この実施例では、周囲核を空気、即ち水中では気泡として供給する。主噴流として高速水噴流となる水は、容器304内における水305が汲み上げられ、高圧ポンプ306で昇圧され、高圧水供給ライン309を通じてノズル301へ導かれる。

【0034】また周囲核となる空気は、コンプレッサ307から圧縮空気供給ライン308を経てノズル301へと送給される。ノズル301は、マニピレータ311によつて、加工対象物303に対向する位置に設置される。ノズル301と加工対象物303間の距離は、上記したような最適スタンドオフ距離である。

【0035】図中の302は、キャビテーションを伴う噴流、310は吸い込みラインである。

【0036】図5に示す実施例は、周囲核を、飽和状態あるいは過飽和状態に空気を含む水から供給する系統図である。

【0037】まず、主流としての高速水噴流は、高圧水供給ライン408で容器404内の水405を吸い込みライン406から汲み上げ、高圧ポンプ407で昇圧し、高圧水供給ライン408で容器404内の水405

7

中へ再び送給し、ノズル401から噴射して作り出す。この主流高速水噴流は、激しいキャビテーションを伴う噴流402となつて加工対象物403へ衝突する。

【0038】一方、周囲核供給用の水は、容器404内の水405を循環ポンプ410で汲み上げ、上方が大気に開口する攪拌槽411内に貯水される。この攪拌槽411の水面近くには、攪拌機412があり、水面が乱れ、水中に過飽和まで空気が溶け込むようになってい

る。
【0039】攪拌槽411内の水は、低圧噴射ポンプ414により汲み上げられ、低圧水供給ライン415を通じてノズル401へと導かれ、キャビテーションを伴う噴流402へ向けて噴射される。

【0040】なお、図中の403は加工対象物、409はマニピュレータ、410は循環ポンプ、413は空気が溶解した水である。

【0041】図15、図16、図17は使用されるノズルの主噴出孔の形状例を示したものである。但し、これらの図では周囲核を供給する周囲流供給孔は省略した。

【0042】図15に示すノズルは、径収縮部（しぼり部）1205を緩やかな形状にしたものである。このノズルには、圧力損失を少なく抑えることができるという特徴がある。

【0043】なお、図中の1201はノズル本体、1202は高圧水、1203は中心軸、1204は高圧水供給流路、1206は主噴出孔である。

【0044】逆に図16に示すノズルでは、径収縮部（しぼり部）1305を鋭くしている。このノズルでは、主噴出孔1306の上流端、即ち主噴出孔1306と径収縮部（しぼり部）1305の接続部で、サブキャビテーション（これは「流入核」としての役割を演じる）が発生し、キャビテーションの促進には効果的であるが、圧力損失が大きくなりやすい。

【0045】なお、図中の1301はノズル本体、1302は高圧水、1303は中心軸、1304は高圧水供給流路である。

【0046】図17に示すノズルは、主噴出孔1406の内部に戸溝（スロット）状のキャビテータ1407を設けたものである。このキャビテータ1407から「流入核」としてのサブキャビテーションを発生させて、噴出後の水噴流におけるキャビテーションを活発にする訳である。本発明の主旨である周囲核の供給のみならず、ノズルの主噴出孔の工夫を行えば、「流入核」が増加し、結局両核の相乗効果によって十分に発達した激しいキャビテーションを伴う高速水噴流が得られる訳である。

【0047】なお、図中の1401はノズル本体、1402は高圧水、1403は中心軸、1404は高圧水供給流路、1405は径収縮部（しぼり部）である。

【0048】次に、キャビテーションを伴う一般的な水

8

中高速水噴流の現象について述べる。図5にその現象を模式的に示すキャビテーションは、大まかに2つのタイプ、即ちキャビテーションクラウド504と紐状の渦糸キャビテーション509に分類される。

【0049】キャビテーションクラウド504は、ノズル501の噴出孔503の出口から爆発的に発生し、下流へ行くに従い成長し、次第にくびれるようになり、下流のある位置までくると分裂し（505）、かたまりとして下流へ放出される。さらに下流に至ると、この分裂したキャビテーションクラウド504のかたまりは消滅し（207）、微細な気泡506が疎らに分散するような状態となる。

【0050】一方、キャビテーションクラウド504の内部あるいは界面の近くには、紐状の渦糸キャビテーション509が生成する。この紐状の渦糸キャビテーション509は、微細な気泡群が数珠のようにつながったり、あるいは細長い管形の気泡が捩じれるようにして成形されているものである。上流側では、渦糸キャビテーション509の発達が不十分（509a）であるが、キャビテーションクラウド504の分裂が生じるほどの下流へ行くと渦糸キャビテーションが発達し（509b）、数も多く見られるようになる。

【0051】後述するが、噴流の空間衝撃圧「第1ピーク」に相当するスタンドオフ距離 x_1 では、キャビテーションクラウド504が連続しており、噴流内部のコア部は連続構造をなしている。

【0052】一方、噴流の空間衝撃圧「第2ピーク」に相当するスタンドオフ距離 x_2 では、キャビテーションクラウド504は分裂し、また紐状の渦糸キャビテーション509が活発に成長するような現象が観察される。

【0053】なお、図中の502は高圧水、508は周囲水である。

【0054】図6は、水中高速水噴流へ供給されるキャビテーション気泡核の流れを模式的に描いたものである。噴出孔603からは、必要な核の一つである流入核が供給される（605）。この流入核は、噴出孔603内において生成するサブキャビテーションの生成によるものである。

【0055】一方、周囲水604からは、噴流の界面を通じて周囲核が供給される（606）。この周囲核は、噴流の界面における剪断層において、渦糸キャビテーションを作り出す。以上の2つのタイプのキャビテーション核が成長することにより、激しいキャビテーションを伴う噴流607が作り出されていく。

【0056】なお、図中の601はノズル、602は高圧水である。

【0057】次に、激しいキャビテーションを伴う噴流に生じる衝撃圧特性を調べるために、感圧フィルム法を用いて、噴流の空間衝撃圧分布を測定した結果について述べる。

【0058】図7にその測定方法を示す。キャビテーション噴流の中心軸703から半径方向に5mm離れた位置に、噴流に平行に感圧フィルム705を設置する。このようにしてスタンドオフ距離 x に対する衝撃圧分布を知ることができる。

【0059】キャビテーションにおいては、キャビテーション気泡の崩壊時に発生する衝撃圧の影響が「線香花火」のように四方八方に及ぶ。実際の加工では、噴流を加工対象面にほぼ垂直に衝突させるが、ここでの感圧フィルム法との違いは、噴流の軸上動圧力が加わることである。従つて、感圧フィルム法でも、キャビテーション噴流の衝撃圧分布特性を把握することができる。

【0060】なお、図中の701はノズル、702は高圧水、704はキャビテーション噴流の輪郭、706は周囲水である。

【0061】図8は、無次元化したスタンドオフ距離 x/D (D はノズルの噴出孔の直径) に対して、噴射圧力 P_1 をパラメータとして、感圧フィルム法により求めた衝撃圧 P_{sh} の空間分布を示したものである。スタンドオフ距離 $x/D=10\sim40$ において最初のピーク「第1ピーク」、また下流側の $x/D=60\sim150$ において2番目のピーク「第2ピーク」が発生することが分かる。「第1ピーク」は狭い範囲で鋭く尖るのに対して、「第2ピーク」は幅広い x/D の領域で緩やかな勾配の形状となつている。

【0062】また、パラメータとした噴射圧力 P_1 に対して、「第1ピーク」は P_1 の影響を余り受けずピークを示すスタンドオフ距離 x/D はほぼ一定である。「第2ピーク」は噴射圧力 P_1 が大きくなると、ピークに相当する x/D が、分布形状があまり変わらないまま下流側へシフトする。

【0063】次に、実際の加工と同様に固体面に噴流を衝突させて、材料の壊食状態を調べた結果について述べる。図10は、壊食試験の状態を表したものである。ノズル901より高圧水902を噴射し、キャビテーション噴流904を、スタンドオフ距離 x の条件のもとで、アルミ合金の試験片905の表面に垂直に衝突させる。

【0064】なお、図中の902は高圧水、903は中心軸、906は跳ね返り噴流、907は壊食部である。

【0065】図11は、このような壊食試験において、壊食による質量損失 Δm を、無次元化したスタンドオフ距離 x/D に対し整理したものである。

【0066】「第1ピーク」の範囲内に入るスタンドオフ距離 $x/D\leq 18$ において、 Δm は最大となる。

【0067】一方、「第2ピーク」相当の $60< x/D < 150$ の領域では、 Δm の増大が全く見られない。 Δm は、 $x/D\leq 18$ で頂点に達し、それより下流における x/D では Δm は連続的に減少し、 $x/D>80$ になると質量損失はほとんど無いに等しくなる。この結果から、「第1ピーク」相当のスタンドオフ距離 x/D にお

けるキャビテーション（これの主役はキャビテーションクラウド）は著しく壊食性があるのに対し、「第2ピーク」の領域では、キャビテーションによる損傷は見られないことが分かる。

【0068】「第1ピーク」における激しい壊食は、図6に示したように連続したキャビテーションクラウドを伴う水噴流内部の連続コア構造の衝突によるものである。これに対し、「第2ピーク」では、激しい壊食を起こすようなタイプのキャビテーションは生じていないことになる。即ち、広域面積部分にエネルギーが分散し、残留応力を改善させるのに丁度良い程度の圧力が発生する訳である。本発明の方法によつて、周囲核を供給すれば、

(1) さらに広い面積の部分にキャビテーション域が拡大する。

【0069】(2) ピーニング時間が短くて済む。

【0070】(3) 材料の表面層だけではなく、より深い部分にまでピーニングの効果が及ぶことにより、材料の疲労強度も向上する。

【0071】という効果が生まれる。

【0072】次に、本発明において、ノズルの構造に対する周囲核の供給法について述べる。図12は、合流スタンドオフ距離に対する応力改善量の結果を示したものである。横軸の周囲核供給流の合流スタンドオフ距離 X_m は、ノズルの噴出孔直径 D で割られて無次元化されている。一方、ピーニング後の圧縮残留応力 $\Delta\sigma'$ からピーニング前の引張残留応力を引いて求めた応力改善量 $\Delta\sigma$ も周囲核を供給しない場合における応力改善量 $\Delta\sigma^*$ により割られて無次元化されている。

【0073】 X_m/D に対する $\Delta\sigma/\Delta\sigma^*$ の特性は、図示したように $x_m/D\leq 70$ にピークを有するなどかな山型のカーブとして得られる。即ち、周囲核供給流の合流位置は、ノズルに近すぎても、また離れ過ぎていても効果が乏しくなるということがこの結果から分かる。周囲核を供給しない場合に比べて、応力改善効果が2倍以上になる領域、つまり $40< X_m< 90$ を好適なスタンドオフ距離と判断することとする。

【0074】図13は、周囲核供給流の合流条件を調べた実験結果であり、合流角度 θ に対する応力改善量 $\Delta\sigma/\Delta\sigma^*$ の変化をまとめたものである。 $\Delta\sigma/\Delta\sigma^*$ の表現法は、図12におけるそれと同一である。

【0075】この実験においては、合流スタンドオフ距離 X_m/D を一定に固定する条件とした。つまり、周囲噴出孔の開口構造の異なる数種類のノズルを用いて実験を行つた訳である。 θ に対して、 $\Delta\sigma/\Delta\sigma^*$ は山型のカーブとなる特性を示すことが分かる。 θ が小さすぎると、周囲核供給法と主流としての高速水噴流が並行流に近くなり、周囲核の供給が不十分になり、キャビテーションが促進されない。一方、 θ が直角に近すぎると、合流部に過度に多くのキャビテーション気泡が発生するた

め、クッション作用により、気泡崩壊時の衝撃圧がキャビテーション気泡群内に吸収されてしまい、キャビテーションは促進されるところか逆に抑制されるようになり、応力改善効果も乏しくなる。この実験結果から、 $\theta = 10^\circ \sim 60^\circ$ さらに望ましくは $\theta = 15^\circ \sim 45^\circ$ の範囲が最適合流条件であることが分かる。 θ をうまく選定することで、周囲核供給の無い場合に比べて応力改善量を3倍近くまで拡大できることになる。

【0076】図14は、本発明の効果を実証した結果を示すものである。ピーニング処理前(X)に比べて周囲核を供給しない場合(Y)でも圧縮側に応力が改善されるが、本発明の実施例(Z)では、さらに大きな応力改善効果の得られることが分かる。

【0077】水中水噴流を利用する本発明の応用範囲は非常に広い。一般に、表面応力改善にあたっては、熱を加えない、つまり金属組織の変態を伴わない常温処理の方が格段に好ましい。この点からも本発明は有利であり、ボイラの耐圧部材等の表面応力改善へも応用することができる。

【0078】水中における作業であることを考えれば、船舶へも適用することができる。海水面下にある船舶の底部には、貝・藻その他の生物が付着し、走航に際してかなりの流動抵抗になる。本発明になる方法は、これらの付着物を海水中において除去することを可能にする。このように、海水中における付着生物の除去が可能になれば、

- ①船をドックに入れ、
- ②ドックから海水をくみ出し、
- ③付着物の混じる洗いを廃棄し、
- さらに、
- ④ドックへ再び海水を入れる。

【0079】と言った一連の操作が一切省略されることになり、船舶の保全がより経済的に行われるようになる。付着物を防ぐための特殊な塗料の使用も削減されれば、海洋の環境保護の観点からも好ましい。特に、ドック付近の有機すず化合物による海洋汚染を防止することができる。

【0080】また本発明は「第2ピーク」を用いるために、加工対象面にダメージを与えないという利点があり、表面精密洗浄あるいは表面仕上げ加工(ポリッシング)としても適用可能である。

【0081】

【発明の効果】本発明をウォータージェットに適用することによって生まれる効果をまとめると次のようになる。

【0082】(1) 水中水噴流に発生するキャビテーションを促進することにより、ピーニング効率を高めることができる。要するに、低い噴射圧力、少ない噴射流量、短い施工時間で、しかも広い面積部分の加工対象面に対し、所定の応力改善が達成できる。これにより応力

腐食割れ(SCC)が防止できる。また疲労強度も向上することで機器の寿命を延長することができる。

【0083】(2) 噴流中の「第2ピーク」に相当するスタンドオフ距離を巧妙に利用すれば、加工対象面に損傷を与えることなく、応力を改善することが可能になる。

【0084】(3) 「第2ピーク」の利用効率を高めることにより、最高衝撃圧の生じる最適スタンドオフ距離をかなり長く確保できるため、ノズルの位置決め(マニユビレーション)に裕度が生じる。従って、高精度の位置決め精度が不要になり、施工コストを低減できる。

【0085】(4) 上記最適スタンドオフ距離を、ノズルからの噴射圧力やノズルの構造を適宜組み合わせることによって変化させることができる。従って、遠隔部分(ノズルからかなり離れた加工対象面)や狭い個所のピーニング施工も可能になる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明に係る加工方法の基本概念を説明するための図である。

【図2】本発明の実施例に係るノズルの断面図である。

【図3】そのノズルの正面図である。

【図4】加工装置の系統図である。

【図5】加工装置の系統図である。

【図6】キャビテーションを伴う水中高速水噴流のメカニズムを説明するための図である。

【図7】キャビテーションを伴う水中高速水噴流のメカニズムを説明するための図である。

【図8】感圧フィルム法を説明するための図である。

【図9】スタンドオフ距離と衝撃圧力との関係を示す特性図である。

【図10】壊食試験を説明するための図である。

【図11】スタンドオフ距離と質量損失との関係を示す特性図である。

【図12】合流スタンドオフ距離と応力改善量との関係を示す特性図である。

【図13】合流角度と応力改善量との関係を示す特性図である。

【図14】従来のピーニング処理と本発明のピーニング処理の効果を比較する特性図である。

【図15】本発明の主噴出孔の変形例を示す断面図である。

【図16】本発明の主噴出孔の変形例を示す断面図である。

【図17】本発明の主噴出孔の変形例を示す断面図である。

【図18】従来例を示す説明図である。

【図19】従来例を示す説明図である。

【符号の説明】

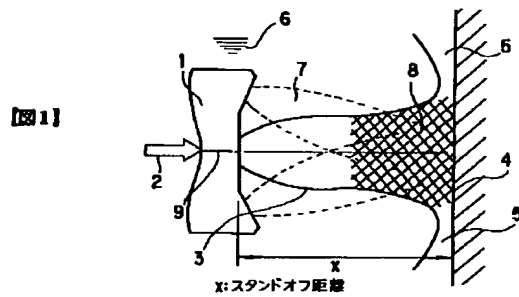
1, 501, 601 ノズル

2, 202, 502, 602, 1202, 1302, 1

13

- 402 高压水
 4, 213 加工対象面
 6, 212, 508, 604 周囲水
 7 気泡核供給水
 8 キヤビテーション促進領域
 9 中心軸
 201 ノズル本体
 205, 1206, 1306, 1406 主噴出孔

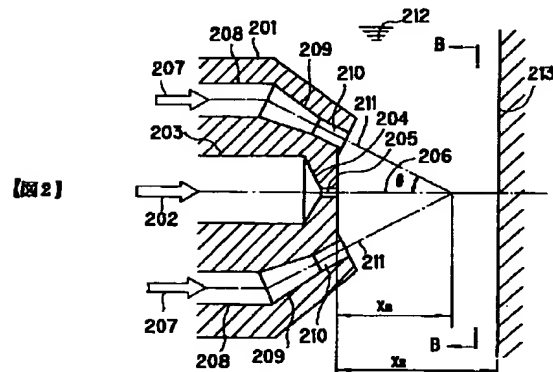
【図1】



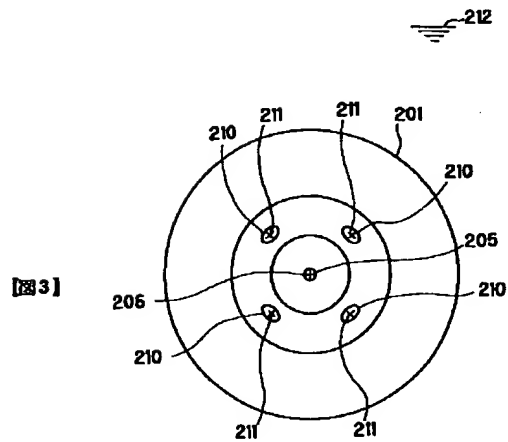
14

- 207 空気あるいは空気飽和水
 210 周囲噴出孔
 503 噴出孔
 504 キヤビテーションクラウド
 509 渦糸キヤビテーション
 606 周囲核の供給
 1201, 1301, 1401 ノズル本体
 1205, 1305, 1405 径収縮部

【図2】

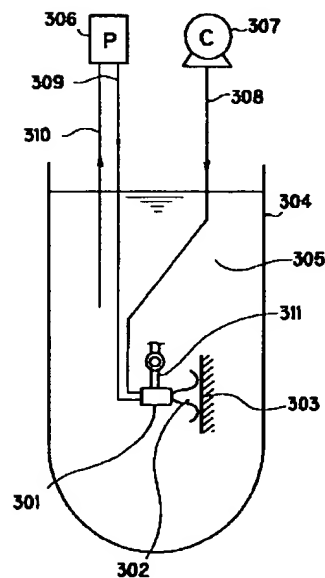


【図3】



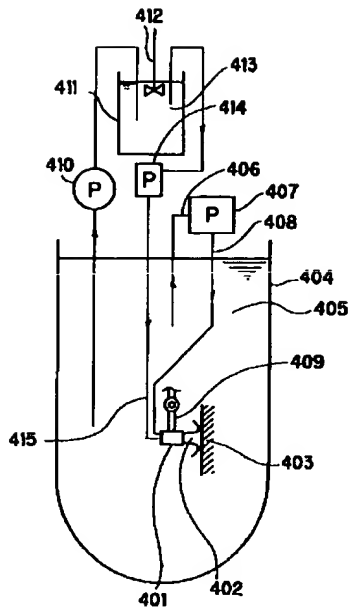
【図4】

【図4】

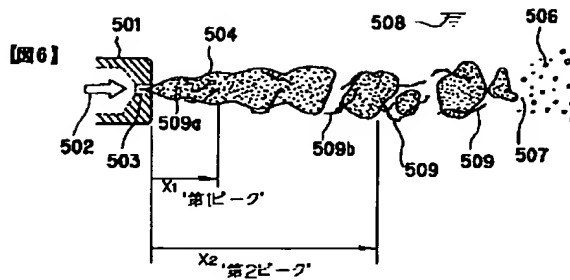


【図5】

【図5】



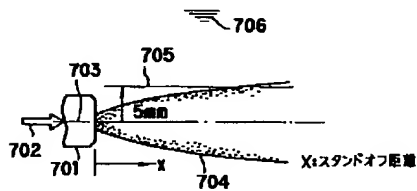
【図6】



X_1 ...第1ピーク'のスタンドオフ距離
 X_2 ...第2ピーク'のスタンドオフ距離

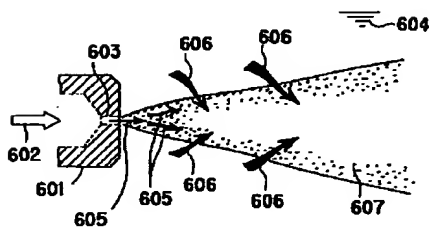
【図8】

【図8】



【図7】

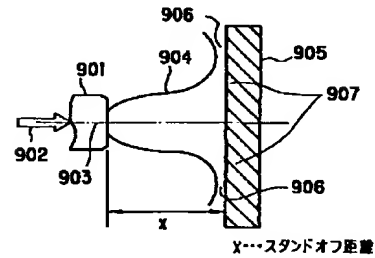
【図7】



【図9】

【図10】

【図10】

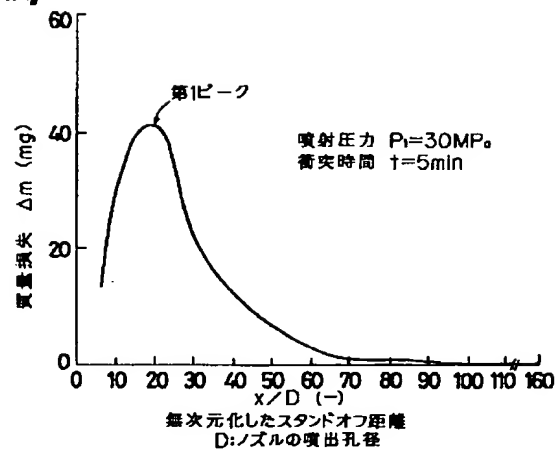
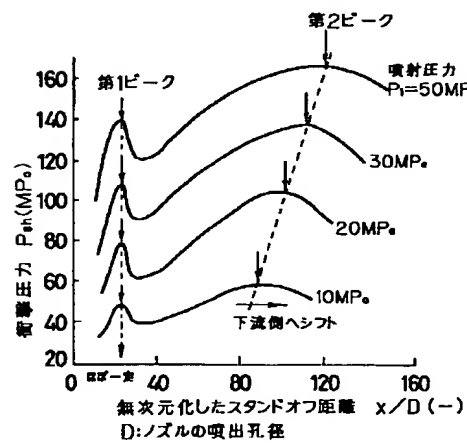


X ...スタンドオフ距離

【図11】

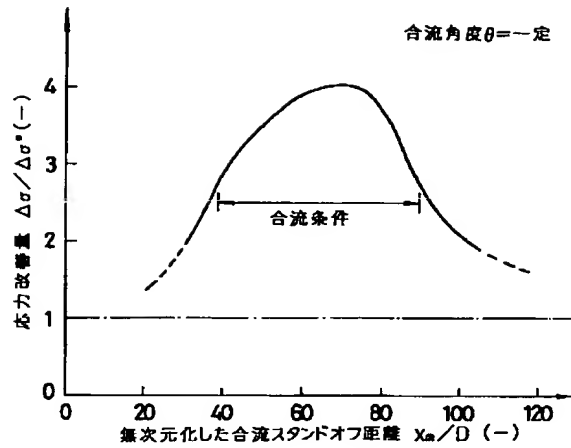
【図11】

【図9】



【図12】

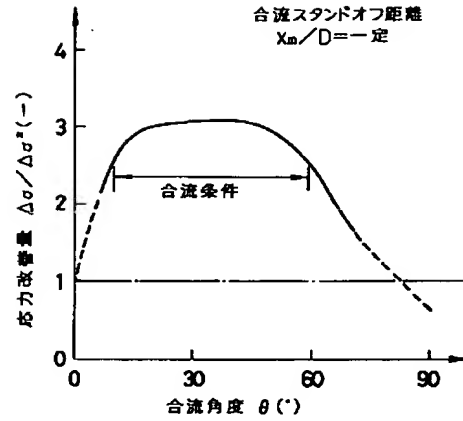
【図12】



D: ノズルの噴出口直径
 x_m : 周囲核供給流の合流スタンドオフ距離
 $\Delta\sigma$: 応力改善量 ($=\Delta\sigma' - (-\Delta\sigma)$)
 $\Delta\sigma'$: ピーニング後の圧縮残留応力
 $-\Delta\sigma$: ピーニング前の引張残留応力
 $\Delta\sigma^*$: 周囲核供給を実施しない場合における
 応力改善量

【図13】

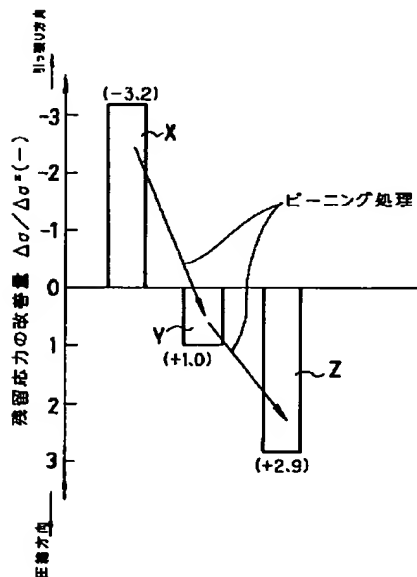
【図13】



$\Delta\sigma$: 応力改善量 ($=\Delta\sigma' - (-\Delta\sigma)$)
 $\Delta\sigma'$: ピーニング後の圧縮残留応力
 $-\Delta\sigma$: ピーニング前の引張残留応力
 $\Delta\sigma^*$: 周囲核供給流を主噴流と平行に流した
 場合における応力改善量

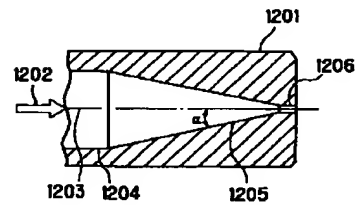
【図14】

【図14】



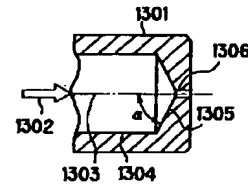
【図15】

【図15】



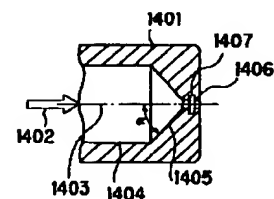
【図16】

【図16】

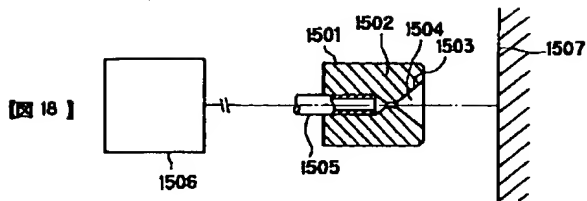


【図17】

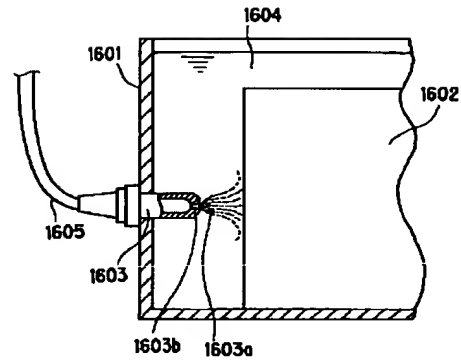
【図17】



【図18】



【図19】



フロントページの続き

(72)発明者 山内 由章
宮城県仙台市太白区松ヶ丘29-31 ハウス
センチュリー203号室

(72)発明者 大島 亮一郎
宮城県仙台市青葉区米ヶ袋2-4-2 ロ
イヤルハイツ米ヶ袋405号

(72)発明者 佐藤 一教
広島県呉市宝町3番36号 バブコック日立
株式会社呉研究所内

(72)発明者 進藤 丈典
広島県呉市宝町6番9号 バブコック日立
株式会社呉工場内

(72)発明者 黒沢 孝一
茨城県日立市幸町3丁目1番1号 株式会
社日立製作所日立工場内